

# DOWNSCALING ESTADÍSTICO APLICADO A LAS ONDAS DE CALOR EN UNA CIUDAD ÁRIDA DEL NOROESTE DE MÉXICO Y ESTIMACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

O. Rafael GARCIA CUETO<sup>1</sup>, Adalberto TEJEDA MARTINEZ<sup>2</sup>,  
Ernesto JÁUREGUI OSTOS<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México*

<sup>2</sup> *Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, México*

<sup>3</sup> *Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México*

rafaelcueto@uabc.mx, atejedam@gmail.com, ejos@atmosfera.unam.mx

## RESUMEN

En la ciudad de Mexicali (32.6°N, 115.4°W, 4 msnm), ubicada en la parte noreste del estado de Baja California, México, se presentan de manera regular las ondas cálidas (OC) durante el verano, sin embargo en los últimos años se han certificado defunciones por el “golpe de calor”. Debido a lo anterior se analizó la evolución temporal de la temperatura y se realizó una caracterización de esos eventos cálidos extremos, para finalmente aplicar la técnica de downscaling estadístico, que en combinación con un modelo climático global, permitió generar escenarios de OC a partir del escenario base de 1961-1990. Los resultados indican que el verano es actualmente más caliente y más extenso de lo que era hace veinte años, y se tienen 2½ veces más OC que en la década de 1971-1980; las variables que caracterizan a las OC tienen una tendencia ascendente y la distribución más adecuada para modelar su ocurrencia fue la Weibull con la temperatura máxima como covariable. La generación de escenarios indica que para los períodos 2010-2039, 2040-2069, y 2070-2099, las OC se incrementarán, respecto del escenario base, en 2.7, 4.6 y 6.9 veces, respectivamente.

**Palabras clave:** Onda Cálida, Reducción de Escala Estadístico, Escenario Climático, Valores Extremos.

## ABSTRACT

In Mexicali city (32.6°N, 115.4°W, 4 masl), located in the northeast of Baja California, México, is usual the presence of heat waves (HW) for the summer, however in last years certified deaths from “heatstroke” had been reported. So that a temporal evolution of the temperature and a characterization of these extreme heat events (EHE) was realized, for finally with the statistical downscaling, and in combination with a global climatic model, it was possible generate scenarios of HW starting from base scenario of 1961-1990. The results indicate that summer is today warmer and more extended in comparison with the summer of the 80's, and actually there is 2½ times more HW that in decade of 1971-1980. The severity variables of a HW have an ascendent tendency and the distribution more adequate for modeling her occurrence was Weibull distribution, with maximum temperature as covariable. The generation of scenarios indicate that for periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2069, the HW will increase, respect from base scenario, in 2.7, 4.6 and 6.9 times, respectively.

**Key words:** Heat Wave, Statistical Downscaling, Climatic Scenario, Extremes Values.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las ondas de calor (OC) son períodos de tiempo inusualmente cálido que son responsables de una alta tasa de mortalidad y morbilidad. La Organización Meteorológica Mundial no ha podido definir este término en su totalidad, ya que varían en carácter e impacto, aún en la misma localidad, y muchos países no tienen definiciones operacionales para alertar a la población, pero estima que el número de muertes relacionadas con estos eventos extremos se podría duplicar en menos de 20 años (WMO, 1998). Las componentes esenciales de una onda de calor debe incluir altas temperaturas en el área de interés y alguna componente temporal de duración (López, 2004). Según el cuarto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), la frecuencia de días cálidos, noches cálidas y ondas de calor se han incrementado en los últimos 50 años, y advierte que más estrés por calor se puede esperar en este siglo XXI. Recientemente se ha reconocido que los riesgos relacionados con el calor se pueden reducir mediante sistemas de alerta, lo que ayudaría a los tomadores de decisiones y al público en general protegerse contra el tiempo atmosférico cálido. Un caso excepcionalmente extremo de OC se presentó en Europa Central y Oeste en el verano de 2003, y particularmente en Francia, en agosto de ese año ocurrieron más de 14000 decesos (WHO, 2003). Algunos autores piensan que ese evento es un ejemplo de una “forma de las cosas por venir” (Beniston y Díaz, 2004) por lo que es importante realizar análisis locales para tomar decisiones en términos de adaptación y estrategias de mitigación. A pesar de contar con estudios detallados de severos eventos cálidos extremos (ECE) (Kart y Knight, 1997) y sus impactos (Changnon *et al.*, 1996), realmente poco se sabe de la evolución climática de las OC, a excepción del realizado por Abaurrea *et al.* (2007), que hacen una excelente modelación estadística de esos ECE y proveen sus posibles trayectorias a mediano plazo.

En el noreste de Baja California, México, se tienen las temperaturas más altas de todo el país, en un período que abarca de Mayo a Septiembre; el clima regional es cálido, seco, muy árido y una extremosa oscilación anual de las temperaturas medias mensuales. La importancia de realizar este estudio radica en que no se ha realizado nada al respecto, y porque en los años del 2000 al 2006 se han reportado defunciones certificadas por el médico forense de la ciudad de Mexicali, y que indican como causal el llamado “golpe de calor”, atribuible a la presencia de una OC. En el año 2006 hubo 29 muertes, el mayor número registrado hasta ahora, por ese motivo. En vista de lo anterior, se realizó este estudio en la ciudad de Mexicali, en el que se analizó el cambio observado de la temperatura máxima diaria de verano en el período de 1951 a 2006, se caracterizó la evolución temporal y estacional, de la ocurrencia, duración e intensidad de las OC y se utilizó el Modelo Estadístico de Downscaling (SDSM, Wilby y Dawson, 2007), que permitió elegir, de entre 17 variables, los predictores más adecuados, y se generaron escenarios de las OC, en combinación con la salida de un modelo de clima global (CGCM1, HadCM3), para períodos de (2010-2039), (2040-2069) y (2070-2099).

## 2. DATOS

El análisis realizado utilizó dos conjuntos de datos: 1) observados y 2) generados por downscaling. Los datos observados fueron las series de temperatura máxima y mínima diaria

de Mexicali de los años de 1951 al 2006, proporcionados por la Comisión Nacional del Agua. La estación meteorológica está situada en el norte de la ciudad de Mexicali (32.6°N, 115.4°W, y 4 msnm (fig. 1). El conjunto de datos obtenidos por downscaling se generaron usando el software SDSM y el experimento que se usó fue el CGCM1 A1. La versión (4.1) del SDSM usado produjo 50 ensembles de datos diarios. Cada período futuro proyectado por el SDSM contiene exactamente 10, 950 datos. Como la versión del SDMS emplea un modelo mensual para las regresiones múltiples hay un valor proyectado para cada “día”. En este estudio se usaron los valores medios del ensemble.

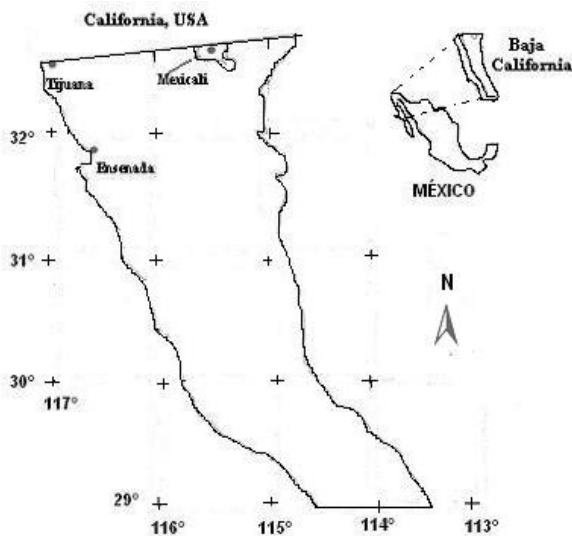


Fig. 1: Ubicación de Mexicali, Baja California, México

### 3. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA TEMPERATURA

De acuerdo al análisis exploratorio anual de la base de datos se decidió que el período a utilizar en este estudio fuera del 1 de Junio al 15 de septiembre, al cual le llamaremos “verano”. De esta manera, y con el propósito de mostrar la evolución de los valores medios de temperatura en el período 1951-2006, y siguiendo el método propuesto por Abaurrea op. cit. (2007), se realizó un análisis térmico, para diversos períodos, de las temperaturas máximas (Tmx) y temperaturas mínimas (Tmn).

#### 3.1. Cambio térmico temporal

Para mostrar la evolución de la temperatura se graficaron los valores medios anuales durante el período 1951-2006. Esto se realizó con curvas suavizadas utilizando el procedimiento lowess, usando un parámetro de ventana de 0.50, tanto para las temperaturas máximas como mínimas, para los meses de verano (1 de junio al 15 de septiembre, fig. 2). Se ve que la Tmx tiene un decremento de 1951 a 1964, posteriormente un período estable (1965-1990), seguido por una fase creciente hasta el 2006. En cuanto a la Tmn se observa un período breve de incremento

(1951-1956), seguido por una fase relativamente estable hasta fines de la década de los 70's, y posteriormente una fase creciente (1977-2006).

Para analizar la evolución de la temperatura en el verano, se graficaron las curvas suavizadas de Tmx y Tmn, correspondientes a 7 períodos traslapados de longitudes de un mes: 15My-15Jn, 1Jn-30Jn, 15Jn-15Jl, 1Jl-31Jl, 15Jl-15Ag, 1Ag-31Ag y 15Ag-15Sp, (fig. 3).

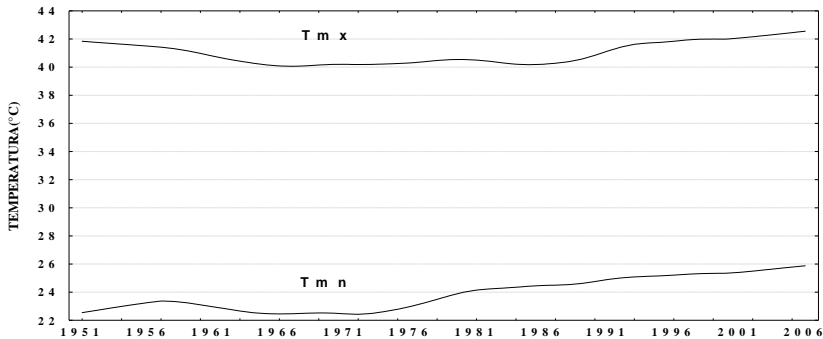


Fig. 2: Evolución anual de las temperaturas máximas (Tmx) y mínimas (Tmn) durante el verano en el período de 1951 a 2006 en Mexicali, B.C., México

De fig. 3 se ve que la Tmx presenta períodos de calentamiento y enfriamiento, de 1951 hasta mediados de los 80's, y después se observa tendencia ascendente que prevalece hasta la fecha (2006). El mayor incremento, de casi 3°C, lo tiene del 1Jl-31Jl, seguido por los del 15My-15Jun y 1Jn-30Jn (casi 2°C). Otro período interesante es el del 15Ag-15Sp, que muestra una tendencia ascendente estos últimos años, después de haber alcanzado una meseta a mediados de los 90's. Del 15Jn-15Jl alcanzó un máximo a principios de los 90's, y a partir de entonces se conserva constante, en cambio el de 15Jl-15Ag, también alcanzó esa meseta, pero desde entonces muestra una tendencia ligeramente descendente. Los resultados anteriores indican que el verano es ahora más caliente, y más extenso, de lo que era hace 20 años.

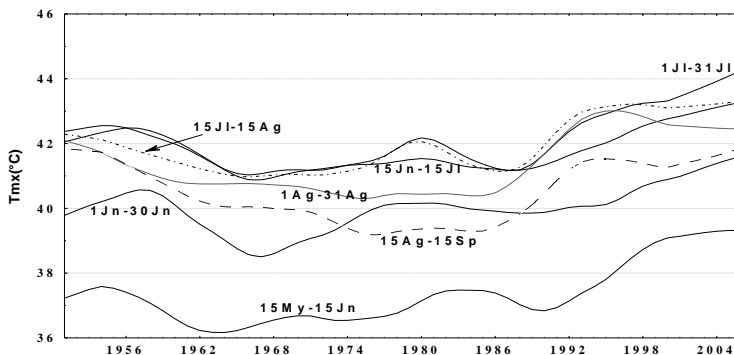


Fig. 3: Evolución anual de la temperatura máxima (Tmx) en siete períodos traslapados de un mes durante el verano en Mexicali, B.C., México (1951-2006)

En la tabla 1 se muestran algunos estadísticos mensuales para Tmx y Tmn: Tm (valor medio), Tmax (valor máximo), dest (desviación estándar) y P90 (percentil 90). Se consideran tres periodos: 1951-1980, 1981-1990 y 1991-2006. A partir del segundo período (1981-1990), los valores medios (Tm), y valores extremos, (Tmax) y P90, se incrementan en todos los meses, ocurriendo los máximos valores, a excepción del mes de septiembre en Tm y Tmax, en el último período (1991-2006). La variabilidad también disminuye en el último período, a excepción del mes de junio, lo que indica mayor homogeneidad en los valores ocurridos. La mayor diferencia térmica de Tm entre los períodos considerados ocurre en el mes de agosto con 2.1°C, entre 1981-1990 y 1991-2006.

	JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPTIEMBRE			
	Tm	Tmx	des	P90	Tm	Tmx	des	P90	Tm	Tmx	Des	P90	Tm	Tmx	des	P90
1951-1980	39.5	42.2	1.4	42.6	41.7	43.5	1.0	43.0	40.8	43.1	1.0	42.2	40.5	43.0	1.8	42.5
1981-1990	40.2	43.0	1.2	41.9	41.7	44.5	1.7	43.9	40.6	43.9	1.6	42.8	39.2	42.7	2.7	42.2
1991-2006	40.7	43.7	1.6	42.7	43.1	44.9	1.0	44.4	42.7	44.1	0.9	43.7	40.4	43.4	1.2	43.3

Tabla 1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE TMX(°C) PARA MESES DE VERANO

En el caso de Tmn se encontró que hay una tendencia ascendente en todos los estadísticos estimados (Tm, Tmax y P90). Los valores de desviación estándar (dest) indican poca variabilidad, y aún con la tendencia creciente, valores homogéneos entre los períodos. La diferencia entre el primer período (1951-1980) y el último período (1991-2006) fluctúa de 2.2°C a 2.7°C en Tm, lo cual es un valor mayor que el obtenido para Tmx.

#### 4. ANÁLISIS DE ONDAS CÁLIDAS

En esta parte se caracterizan las ondas cálidas, y correspondió a la metodología estadística de valores extremos, analizar estos eventos cálidos extremos (ECE).

##### 4.1. Definición de onda cálida

Dado que no hay una definición universal para dar inicio a una onda cálida, se decidió usar un “exceso sobre un umbral”. Se seleccionó como umbral el valor de 44°C, que es el percentil 90 de los datos diarios de temperatura máxima (Tmx) del verano del período de estudio (1951-2006). Ya que el umbral es el más alto de los encontrados en los estudios revisados previamente, se decidió que un día es suficiente para contabilizarla como onda cálida, sin importar si en días previos o posteriores se presenta un valor más bajo que el umbral elegido. Para resumir la severidad de cada ECE se usaron tres variables (Abaurrea op.cit. 2007): la longitud (L), que es el número de días del evento; la intensidad máxima (Imx) que se refiere al máximo valor del exceso sobre el umbral seleccionado de temperatura máxima en el período; y la intensidad media (Imd), que es la relación entre el exceso total, definido como las excedencias acumuladas de la Tmx sobre el umbral, y la longitud del evento.

#### 4.2. Evolución de las ondas cálidas

Al aplicar la definición enunciada previamente se encontraron 469 ondas cálidas, o equivalentemente, 469 eventos cálidos extremos. En la gráfica 5 se muestra su comportamiento relativo por décadas, y en la que se demuestra su tendencia ascendente a partir de la década de los 70's. De hecho, en el último período (1991-2006) se tienen 2½ veces más episodios cálidos que en la década de 1971-1980.

En la tabla 2 se muestra para cada década las variables que caracterizan las ondas cálidas; después de una disminución en los 60's y 70's, la longitud media de los eventos se ha ido incrementando hasta llegar a ser estables; los valores máximos y medios de intensidad también presentan una tendencia ascendente, aunque ya llegaron a una cresta en la década de los 90's, y actualmente (2001-2006) sus valores se han estabilizado con respecto a los del período anterior. La longitud de los eventos presenta en el último período un registro que es un record hasta la fecha: 20 días consecutivos con una temperatura mayor de 44°C.

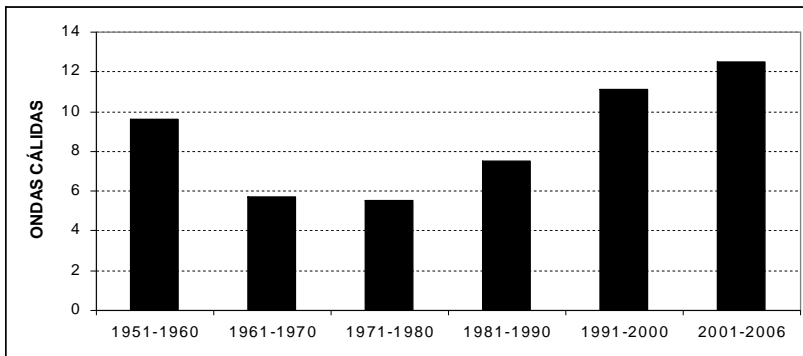


Fig. 4: Frecuencia Relativa de Ondas Cálidas (temperatura > 44°C durante 1 o más días consecutivos) en Mexicali, B.C., México en el período de 1951 a 2006.

Período	L				Imx				Imd			
	Med	Max	P50	P90	Med	Max	P50	P90	Med	Max	P50	P90
51-60	2.4	9	2.0	5.0	3.5	5.0	3.1	4.8	1.2	1.6	1.2	1.6
61-70	1.5	6	1.0	3.0	2.1	3.7	2.0	3.5	0.9	1.5	0.9	1.4
71-80	1.6	5	1.0	4.0	2.3	2.9	2.5	2.8	1.0	1.3	1.0	1.2
81-90	2.1	12	1.0	4.0	2.9	5.4	2.5	5.3	1.1	1.7	1.0	1.7
91-00	2.6	13	2.0	5.0	4.7	8.0	4.8	6.8	1.4	2.3	1.5	2.1
01-06	2.6	20	2.0	6.0	4.6	6.5	4.3	6.5	1.3	1.7	1.2	1.7

Tabla 2: VALORES MEDIO, MÁXIMO Y PERCENTILES 50 Y 90 DE LAS VARIABLES DE SEVERIDAD POR DÉCADA, PARA MEXICALI, B.C., MÉXICO

Para analizar el perfil estacional de las ondas cálidas, se calcularon para cada mes y década la frecuencia media y el percentil 90 de las variables de severidad (tabla 3).

Período	Frec. media				L (p90)				Ix (p90)				Im (p90)			
	Jun	Jul	Ag	Se	Jun	Jul	Ag	Se	Jun	Jul	Ag	Se	Jun	Jul	Ag	Se
51-60	2.4	3.1	2.4	1.7	9.0	14.0	12.5	8.0	4.4	4.3	2.9	2.4	1.8	1.8	1.1	1.5
61-70	1.1	2.2	1.8	0.6	6.0	6.5	11.0	3.0	3.4	2.2	2.5	1.4	1.7	1.3	1.3	0.7
71-80	1.6	2.5	1.1	0.3	9.0	9.5	2.5	4.0	2.6	2.8	2.4	1.6	1.7	1.4	1.9	0.8
81-90	1.6	3.0	2.2	0.7	12.5	16.0	12.5	4.5	4.6	3.9	4.2	2.9	2.1	1.8	1.7	1.9
91-00	2.2	4.2	4.1	0.6	14.5	19.0	17.5	5.0	4.3	6.7	5.4	2.5	2.3	2.0	2.8	1.6
01-06	2.7	4.7	3.8	1.3	12.0	25.0	11.0	6.0	3.2	6.5	4.0	2.5	3.0	1.8	2.2	1.4

Tabla 3: NÚMERO MEDIO ONDAS CÁLIDAS Y PERCENTIL 90 DE VARIABLES DE SEVERIDAD POR MES Y DÉCADA, PARA MEXICALI, B.C., MÉXICO

Todos los meses han incrementado su frecuencia de ocurrencia, siendo Julio y Agosto los más proclives a tener esos eventos extremos, seguido de Junio y Septiembre. Las longitudes de eventos son crecientes para todos los meses, lo que es un indicador del grave problema, aunque Junio presenta un retroceso en el último período. Las intensidades máximas y medias también muestran un comportamiento creciente pero parecen haberse estabilizado según lo reportado en los últimos dos períodos.

#### 4.3. Modelación de ocurrencia de eventos extremos

Se modeló la ocurrencia de OC con la distribución de Valores Extremos Generalizados:

$$G(z; \mu, \sigma, \xi) = \exp[-\{1 + \xi(z - \mu)/\sigma\}^{-1/\xi}]$$

donde  $-\infty < \mu < \infty$ ,  $\sigma > 0$  y  $-\infty < \xi < \infty$  son los parámetros de ubicación, escala y forma, respectivamente. El método para estimar los parámetros fue el de Máxima Probabilidad. Se usó el paquete extRemes (Gilleland y Katz, 2005) de R (R Development Core Team, 2004) porque es una fuente abierta, está particularmente bien orientado a aplicaciones climáticas, y tiene la habilidad de incorporar información de covariables para estimar parámetros. La figura

5 muestra el diagnóstico de tal ajuste, y la tabla 4 los estimadores de las OC con y sin covariables.

Parámetro	Estimador	Error Estándar
Ubicación ( $\mu$ )	6.74638	0.61265
Escala ( $\sigma$ )	3.96961	0.45372
Forma ( $\xi$ )	-0.20528	0.12009
Probabilidad log negativo: 159.489072		

Parámetro	Estimador	Error Estándar
Ubicación ( $\mu_0$ )	-122.10346	8.13580
Ubicación ( $\mu_1$ )	3.16577	0.19792
Escala ( $\sigma$ )	2.42660	0.27415
Forma ( $\xi$ )	-0.49597	0.09589
Probabilidad log negativo: 122.352439		

Tabla 4: ESTIMADORES DE PARÁMETROS DEL AJUSTE DE ONDAS CÁLIDAS, Y LA INCORPORACIÓN DE LA TEMPERATURA MÁXIMA COMO UNA COVARIABLE EN EL PARÁMETRO DE UBICACIÓN (TABLA DE LA DERECHA).

De la figura 5, al observar las gráficas de probabilidad y de cuantiles se sugiere que las suposiciones subyacentes para la distribución VEG son razonables para los datos de ondas cálidas. De acuerdo al parámetro de forma ( $\xi$ ) la distribución más adecuada para modelar la ocurrencia de ondas cálidas es la de Weibull. La inclusión de la temperatura máxima como una covariable en el parámetro de ubicación ( $\mu$ ) de VEG produjo una mejoría significativa (al nivel del 5%) sobre el ajuste inicial, lo cual fue corroborado con el estadístico de prueba de razón de probabilidad que con un valor de 74.3, es mucho más grande que el nivel crítico de  $\chi^2$  con un grado de libertad que es de 3.84. Específicamente el modelo obtenido se resumió en la tabla 4, parte derecha, donde el parámetro de ubicación se modela como una regresión lineal de la forma siguiente:  $\mu(x) = \mu_0 + \mu_1 x$ , donde  $x$  es la temperatura máxima. Se puede ver que conforme la temperatura máxima se incrementa, los valores del parámetro de ubicación se hacen cada vez más positivos, indicando que los eventos cálidos extremos se presentan con más frecuencia conforme la temperatura máxima se incrementa.

## 5. DOWNSCALING ESTADÍSTICO DE LAS ONDAS DE CALOR

Los Modelos de Circulación General sugieren que las concentraciones ascendentes de gases invernadero tendrán implicaciones significativas en el clima a escala global y regional, particularmente un aumento en el número de eventos extremos. Sin embargo esos modelos no se pueden usar para estudios de impacto local por su amplia resolución espacial (típicamente del orden de 50, 000 km<sup>2</sup>) y su incapacidad para tomar en cuenta rasgos importantes a una escala inferior a la rejilla utilizada, como nubes y topografía. Por esa razón se utilizó el Statistical Downscaling Model (SDSM, Wilby y Dawson, 2007) que permitió generar escenarios de OC a partir del escenario base de 1961-1990, para los períodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099. Brevemente el SDSM se puede describir como un híbrido de técnicas de regresión múltiple y de downscaling estocásticas.



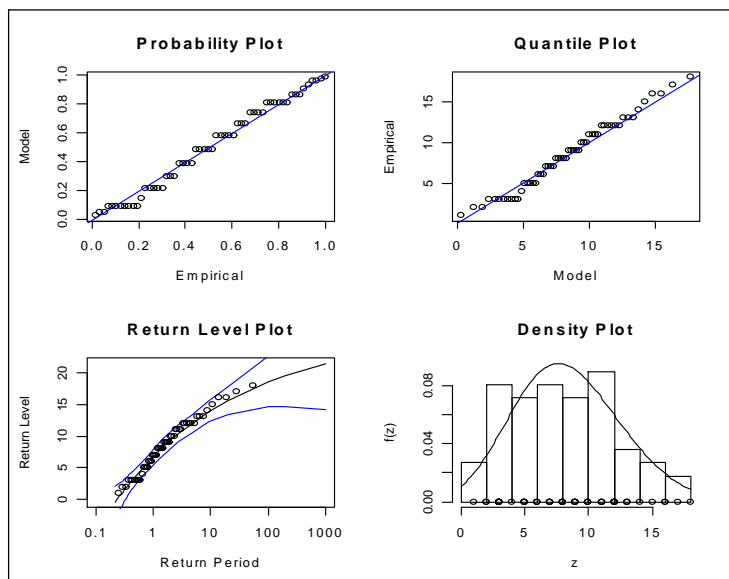


Fig. 5: Diagnóstico de ajuste de la distribución VEG para las ondas cálidas de Mexicali, B.C., México. Los cuantiles y el nivel de retorno se refieren al número de observaciones.

Los resultados “downscaled” son estadísticamente significativos al 95% ó más. Previo a la generación de escenarios se realizó un análisis de la temperatura máxima diaria mediante técnicas de regresión contra predictores estadísticamente seleccionados usando conjuntos de datos del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) y se calibraron las ecuaciones de regresión resultante, en la que se encontró una igual dispersión de los residuales en toda la serie de valores del predictando modelado. Posteriormente se verificó la precisión de las ecuaciones resultantes con el escenario base (1961-1990) downscaled y se comparó con valores observados para el mismo período encontrándose un buen ajuste. Con los modelos validados se construyeron series de proyecciones de temperatura downscaled. Se utilizaron valores de predictores de experimentos HadCM3 A2(a) y CGCM1 (GHG+A1). El CGCM1 tiene una resolución espacial de 3.75° de longitud por 3.75° de latitud, y el punto de rejilla seleccionado para obtener las variables predictoras fueron las coordenadas 31.54°N, 116.25°W; se obtuvieron 140 años de datos predictores diarios (1961-2100), normalizados del escenario base 1961-1990. El HadCM3 tiene una resolución espacial de 3.75° de longitud por 2.5° de latitud, y se obtuvieron las variables predictoras al punto de rejilla más cercana a Mexicali, 31.34°N, 117.25°W, para el período 1961-2099. En las figuras 6 y 7 se muestran los escenarios de ondas cálidas para los 2020’s y 2080’s bajo el forzamiento del CGCM1 A1 y su comparación con las condiciones actuales; se observa tanto un aumento en la frecuencia mensual, como un inicio más temprano y un final más tardío de días cálidos (>44°C). Mientras que en el período (1961-1990) se tuvieron 401 ondas cálidas, en el escenario de los 2020’s y 2080’s se tendrían 1083 y 2767 OC, es decir, un aumento de 2.7 y 6.9 veces, respectivamente. Los resultados para el HadCM3 indicaron escenarios menos peores que el mostrado para el CGCM1.

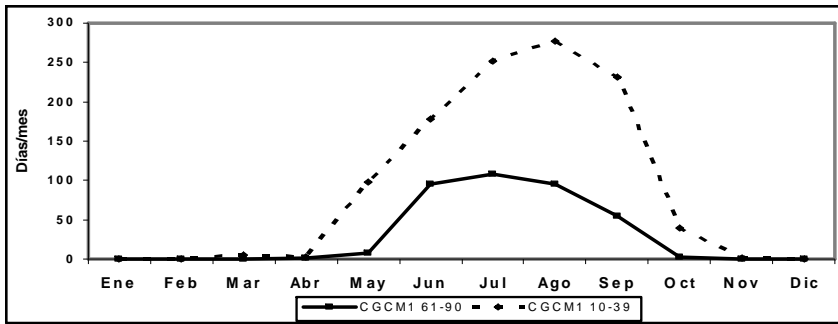


Fig. 6: Frecuencia mensual días cálidos ( $>44^{\circ}\text{C}$ ) en Mexicali, B.C. con predictores CGCM1 downscaled bajo condiciones del escenario base (1961-1990) y forzamiento futuro 2020's.

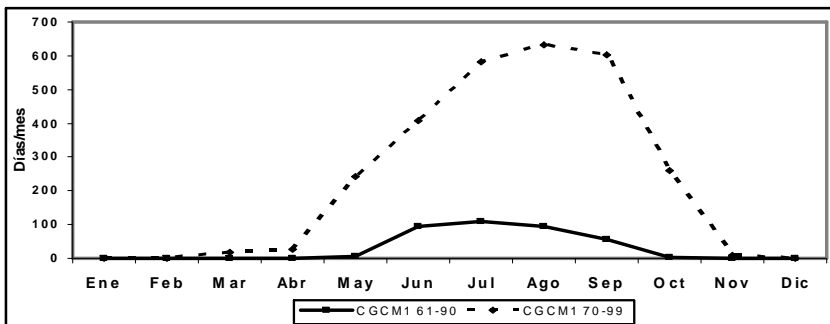


Fig. 7: Frecuencia mensual días cálidos ( $>44^{\circ}\text{C}$ ) en Mexicali, B.C. con predictores CGCM1 downscaled bajo condiciones del escenario base (1961-1990) y forzamiento futuro 2080's.

## 6. COMENTARIOS FINALES

Para Mexicali, B.C., una de las ciudades mexicanas con gran variabilidad térmica anual, ha quedado de manifiesto que las ondas cálidas, de acuerdo a las tendencias observadas y futuras proyecciones obtenidas, son y seguirán siendo un peligro cada vez mayor con serias consecuencias en la salud si no se toman medidas que reduzcan su riesgo. Los resultados indican que el verano es actualmente más caliente y más extenso de lo que era hace veinte años, y hoy se tienen  $2\frac{1}{2}$  veces más OC que en la década de 1971-1980. Las variables de severidad, longitud, intensidad media e intensidad máxima, que caracterizan a las OC tienen una tendencia ascendente; la distribución más adecuada para modelar la ocurrencia de OC fue la Weibull con la temperatura máxima diaria como covariable. De acuerdo a la generación de escenarios por downscaling estadístico, se obtuvo que para los períodos 2010-2039, 2040-2069, y 2070-2099, las OC se incrementarán, respecto del escenario base (1961-1990), en 2.7, 4.6 y 6.9 veces, respectivamente. Aunque este método adolece de una invariancia en el tiempo en cuanto a la conducta de los predictores, es una herramienta interesante que nos permite tener un panorama de las futuras condiciones bajo condiciones de un aumento de gases de invernadero.

## 7. AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece el apoyo financiero al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) de la SEP y a la Comisión Nacional del Agua por los datos de temperatura facilitados para este estudio.

## 8. REFERENCIAS

- ABAURREA, J. ASÍN, J., CEBRIÁN, A.C. and CENTELLES, A. (2007). "Modeling and forecasting extreme hot events in the central Ebro valley, a continental-Mediterranean area". *Global and Planetary Change*, 57, pp. 43-58.
- BENISTON, M. And DÍAZ, F.H. (2004). "The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland". *Global and Planetary Change*, 44, pp. 73-81.
- CHANGNON, S.A., KUNKEL, K.E. and REINKE, B.C. (1996). "Impacts and responses to 1995 heat wave: A call of action. *Bulletin American Meteorological Society*, 77, pp. 427-430.
- GILLELAND, E. And KATZ, W.R. (2006). *Analyzing seasonal to interannual extreme weather and climate variability with the extremes toolkit*.
- GILLELAND, E. And KATZ, W.R. (2006). *Weather and climate applications of extreme value statistics, extremes toolkit*. On-line: <http://www.esig.ucar.edu/extremevalues/evtk.html>.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report*. Full Report On-Line: <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.
- KARL, T.R. and KNIGHT, R.W. (1997). "The 1995 Chicago heat wave. How likely is a recurrence?". *Bulletin American Meteorological Society*, 78, pp. 1107-1119.
- LÓPEZ, D.J.A. (2004). Análisis de tendencias en olas de calor a partir de series largas de temperatura. En: GARCIA-CODRON, J.C., LIAÑO, C.D., FERNÁNDEZ DE ARROYABE, H.P., GARMENDIA, P.C. y RASILLA, A.D. (Eds.). *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria, Serie A, no. 4, Santander.
- R Development Core Team (2004). *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. On-Line: <http://www.R-project.org>.
- WHO (2003). *The health impacts of 2003 summer heat-waves*. Briefing note for the delegations of the fifty-third session of the WHO (World Health Organization) Regional Committee for Europe, 12 pp.
- WILBY, L.R. and DAWSON, C.W. (2007). Statistical Downscaling Model Version 4.2. User Manual. On-Line: <https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/index.html>